

МЕТОДИКА З ПРОЕКТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

В статті представлена методика з проектування економічних залізобетонних конструкцій, що забезпечує найменшу вартість.

Ключові слова: методика, економічні залізобетонні конструкції, найменша вартість.

В статье представлена методика по проектированию экономических железобетонных конструкций, которая обеспечивает наименьшую стоимость.

Ключевые слова: методика, экономичные железобетонные конструкции, наименьшая стоимость.

The method of designing low power-intensive reinforced concrete constructions has been developed of minimum cost.

Key words: method, power-intensive reinforced concrete constructions, minimum cost.

Вступ. Важливими методами здійснення поставлених завдань є методи ефективного проектування конструкцій, що забезпечують використання найбільш економічних будівельних конструкцій, в тому числі і залізобетонних.

Методи проектування залізобетонних конструкцій можна розділити на дві групи: *методи, головна мета яких отримати найбільш ефективне армування при заданих перерізах елементів конструкції і методи визначення перерізів елементів конструкції, що забезпечують найменшу вартість.* Як в першому, так і в другому випадку повинна забезпечуватися міцність, жорсткість та тріщиностійкість конструкцій. За першою групою методів відомі роботи М.І. Рейтмана., Л.І. Ярина [1], М.В. Краковського та ін, за другою групою методів – К.К. Антонова, В.І. Реп'яха [2] та ін. Більш складною є друга група методів, оскільки в першій групі задання розмірів перерізу елементів зумовлює підбір перерізу арматури. Розроблені методи визначення перерізів елементів конструкцій другої групи проектування, що забезпечує найменшу вартість, мета яких допомогти проектним організаціям успішно вирішити сформульовані вище задачі, особливо використання в проектах найбільш економічних залізобетонних конструкцій [3,4,5]. Методика розроблена спільно з к.т.н. Реп'яхом В.І.

Галузь застосування. Методика розглядає питання, які пов'язані з економічним та ефективним використанням залізобетонних конструкцій у проектюваних спорудах. Галуззю застосування методики є усі залізобетонні конструкції цивільних (житлових, громадських), промислових, сільсько-господарських будівель та споруд. Методика розрахована на використання у таких випадках: порівняння характеристик різних залізобетонних конструкцій; складання технічно-економічної характеристик залізобетонних конструкцій; визначення мінімальних розмірів залізобетонних елементів і конструкцій: плит, балок, стояків, плитних фундаментів під стояки, сферичних куполів, ребристих покриттів, залізобетонних каркасів тощо.

На основі використання принципів, викладених у пропонованій методиці, можливо визначення ефективних розмірів будь-яких залізобетонних елементів і конструкцій.

Визначення. Дані визначення понять, використаних у окремих розділах методики.

Робоча висота перерізу балки або плити. Відстань між центром ваги розтягнутої арматури та крайніми волокнами стиснутої зони позначають $h_0, \varphi_\sigma h$, або $h (1-\eta)$.

Об'єм бетону у виробі. Об'єм бетону, обчислений за фактичними розмірами запроєктованої залізобетонної конструкції зазвичай визначають множенням основних розмірів елемента конструкції (довжини, ширини і висоти) із введенням коефіцієнта повноти і позначають v_6 .

Розрахункова висота поперечного розрізу балки або плити. Відстань між центром ваги розтягнутої арматури та центром ваги стиснутої частини перерізу позначають vh_0 , де v – спеціальний коефіцієнт розрахункової висоти перерізу.

Об'єм робочої арматури залізобетонного елемента. Обчислюють як добуток поперечного перерізу робочої арматури на її повну довжину і позначають v_a .

Коефіцієнт повноти перерізу залізобетонного елемента. Відношення фактичного об'єму бетону елемента до об'єму визначене за габаритними розмірами елемента позначають: для плити $\varphi_{зп}$, для балки - $\varphi_{зб}$, для стояка - $\varphi_{зс}$.

Залізобетонний елемент. Під цим розуміють окрему балку, плиту, стояк, фундамент.

Залізобетонна конструкція (каркас). Сукупність несучих балок, стояків, фундаментів.

Залізобетонна оболонка. Сукупність несучих залізобетонних плит, як плоских так і криволінійних.

Коефіцієнт використання арматури. Відношення повного об'єму або повної маси сталі, яку використовують для армування залізобетонного елемента до об'єму або маси тільки робочої арматури елемента. Під робочою арматурою елемента розуміють тільки одностороннє розташування арматури. Ці коефіцієнти позначають: для плити - $\varphi_{ап}$, балки - $\varphi_{аб}$, стояка - $\varphi_{ас}$.

Умовний бетон. Під умовним бетоном v розуміють суму використаного на конструкцію об'єму бетону v_6 та об'єму сталі v_a , яку за вартістю приводять до бетону.

Одинична витрата умовного бетону W . Цим поняттям визначають умовний бетон, віднесений до одиниці об'єму простору, який зайнятий конструкцією.

Арматурне число ρ . Відношення величини повної витрати сталі на залізобетонний елемент до умовної витрати сталі, отриманої шляхом ділення узагальненого зусилля на розрахункову величину опору сталі. Для згинальних елементів узагальнене зусилля дорівнює μ/h_0 , для позакентрова стиснутих стояків - $N_{пр}$.

Нижче наведені **основні техніко-економічні показники**, які використані у пропонованій методиці. Враховуючи, що залізобетонні конструкції – це поєднання

двох матеріалів (бетону і сталі), серед показників, що характеризують конструкцію, основними є показники з витрати бетону і сталі.

Ці показники надані у вигляді витрат: а) v_6 - бетону в м^3 і сталі в $\gamma_a v_a$ в кг (або т) у цілому на конструкцію, де v_a – повний об’єм сталі, а γ_a – об’ємна маса сталі; б) бетону в м^3 і сталі в кг на м^2 горизонтальної поверхні, що займає конструкція. Це може бути площа підлоги, корисна площа або робоча площа будинку; в) бетону в м^3 і сталі в кг на м^3 об’єму, що займає дана конструкція; г) сталі в кг на один м^3 бетону у справі.

Для визначення показника за пунктом „в” необхідно знати об’єм якій займає дана конструкція
$$v = \xi_0 l_1^2 l_2 \quad (1)$$

де ξ_0 – відношення висоти об’єму (це може бути також висота поверху будинку, висота ярусу каркаса) до прольоту конструкції; l_1 -- прольот конструкції (каркасу); l_2 – крок конструкції (каркасу).

Об’єм за формулою (1) є умовним. Взагалі ширина споруди може бути кратною прольоту l_1 , довжина споруди може бути кратною кроку l_2 і об’єм споруди може складатися з великої кількості умовних об’ємів.

Умовний бетон і критерій економічності. Залізобетонна конструкція характеризується також своєю оптовою вартістю W_c грн., яку визначають за формулою
$$W_c = C_6 V_6 + C_a V_a \quad (2)$$
 де C_6 - середня вартість одного м^3 бетону, C_a - середня вартість одного м^3 сталі.

Залізобетонна конструкція може характеризуватися величиною умовного бетону W в м^3 , яку обчислюють шляхом ділення оптової вартості залізобетонної конструкції на вартість одного м^3 бетону:

$$W = v_6 + (C_a V_a / C_6) \quad \text{або} \quad W = v_6 (1 + C_a V_a / C_6 V_6). \quad (3)$$

Завжди будь-який об’єм залізобетонної конструкції, може бути вимірний умовними об’ємами за формулою (1). Можна визначати величині V_6 і V_a , на один умовний об’єм. Надалі під V_a і V_6 розуміють об’єм бетону і об’єм сталі, що приходиться на умовний об’єм за формулою (1).

Одиничною витратою умовного бетону W називають витрата умовного бетону, що приходиться на одиницю об’єму конструкції. З урахуванням (1), (2) і (3) маємо
$$W = V_6 / \xi_0 l_1 l_2 (1 + C_a V_a / C_6 V_6). \quad (4)$$

Найбільш економічною вважається та залізобетонна конструкція, яка має найменше значення одиничної витрати умовного бетону W . Таким чином формула (4) є критерієм економічності залізобетонної конструкції.

Формула (4) має подвійне застосування: за допомогою величини W вибирають (шляхом порівняння) найбільш економічну залізобетонну конструкцію; шляхом мінімізації виразу (4) знаходять ефективне, найбільш економічне рішення конструкції.

Показники витрат умовного бетону. Будь яка залізобетонна конструкція характеризується: - сумарною величиною умовного бетону за формулою (3); - одиничною витратою умовного бетону за формулою (4); - приведеною товщиною умовного бетону h_q .

$$h_q = W \xi_0 l_1 = V_6 / l_1 l_2 (1 + C_a V_a / C_6 V_6) \quad (5)$$

Таким чином, приведену товщину умовного бетону отримують шляхом множення одиничної витрати умовного бетону на $\xi_0 l_1$ -- висоту умовного об'єму. Об'єм бетону будь якого залізобетонного елемента визначають за формулою:

$$V_6 = \varphi_3 \lambda \alpha h^3 \quad (6)$$

Об'єм, обчислений в припущенні, що повна висота перерізу залізобетонного елемента дорівнює h , ширині перерізу $b = \alpha h$, коефіцієнт повноти перерізу становить $\varphi_3 = F/bh$, де F -- площа поперечного перетину елемента, довжина елемента рівна λh , де λ - відношення повної довжини елемента до його висоти перетину. Для плит це буде $\lambda_{пл}$, для балок λ_6 . Об'єм повної витрати сталі на залізобетонний елемент визначається за формулою: $V_a = \mu h \tau \alpha \varphi_a h^3$. (7)

Об'єм обчислений в припущенні того, що коефіцієнт армування робочою арматурою, дорівнює μ , робоча висота перерізу $h_0 = \varphi_a h$, довжина робочої арматури дорівнює $\tau \lambda h$. Тут φ_a - коефіцієнт використання арматури. Відношення повного об'єму сталі, витраченої на армування залізобетонного елемента до об'єму бетону цього елемента дорівнює: $V_a / V_6 = \mu \varphi_a \tau \varphi_6 / \varphi_3$. (8)

Якщо залізобетонний елемент, розташований уздовж розміру l_1 , то l_1 можна визначити через довжину елемента λh : $l_1 = \Delta \lambda h$. (9)

Крок l_2 можна визначити через ширину перерізу елемента αh : $l_2 = \tau \alpha h$. (10)

Якщо залізобетонний елемент розташований уздовж розміру l_2 , то можна написати: $l_2 = \Delta_1 \lambda_1 h_1$ та $l_1 = \tau_1 \alpha_1 h_1$. (11)

Тоді для залізобетонного елемента, розташованого вздовж l_1 , одиничну витрату умовного бетону визначають за формулою:

$$W = \frac{\varphi_3}{\xi_0 \Delta^2 \lambda \tau} (1 + \mu \varphi_a \tau \frac{C_a \varphi_b}{C_b \varphi_3}). \quad (12)$$

Для залізобетонного елемента, розташованого вздовж l_2 одиничну витрату умовного бетону визначають за формулою:

$$W = \frac{\varphi_3}{\xi_0 \Delta_1 \tau_1^2 \alpha_1} (1 + \mu \varphi_a \tau \frac{C_a \varphi_b}{C_b \varphi_3}). \quad (13)$$

Витрата сталі в кг на m^3 бетону, на основі формули (8) визначають за формулою $\frac{Q_a}{V_b} = \mu \varphi_a \gamma_a \tau \frac{\varphi_b}{\varphi_3}$. (14)

Отже, формулі (13) можна надати такий вигляд:

$$W = \frac{\varphi_3}{\xi_0 \Delta l \tau l^2 \alpha} (1 + \frac{C_a Q_a}{C_b V_b r_a}). \quad (15)$$

Визначення вартісних і арматурних показників. Вартість та витрати арматурної сталі залізобетонних елементів, що визначають їхню ефективність, розглянуті нижче.

Оптова вартість. Для визначення величини умовного бетону необхідне знання таких вартісних показників, як C_6 і C_a . Як правило, C_6 і C_a визначають на підставі заводських калькуляцій на відпускну ціну одного m^3 залізобетонної конструкції. Оптову ціну C одного m^3 залізобетонної конструкції встановлюють

заводською калькуляцією без поділення на C_6 і C_a :

$$C = \Sigma M + \Sigma Z + \Sigma A + \Sigma U + \Sigma HZ \pm P = C_6 + C_a, \quad (16)$$

де ΣM -- вартість бетонної суміші і сталі на m^3 виробу, включаючи витрати на мастила, електроди, флюс тощо; ΣZ -- витрати на зарплату з усіма операціями, в тому числі на виготовлення арматурних каркасів, на приготування бетонної суміші, на формування виробу; ΣA -- амортизаційні витрати на всі види устаткування і загальнозаводські пристосування та інструменти; ΣU -- вартість опалубки, спеціальних пристосувань; ΣHZ -- цехові, загальнозаводські та невиробничі витрати; P -- прибуток.

За наявності оптової ціни C , визначають C_a шляхом обчислення витрат ΣM на всі види сталі, використаної в конструкції і матеріалах, пов'язаних з виготовленням арматурних каркасів. Виділяють трудові витрати на виготовлення арматурних каркасів ΣZ_a , амортизаційні витрати на все устаткування пов'язане з виготовленням арматурних каркасів, цехові, загальнозаводські та невиробничі витрати а також прибуток відповідно до питомої ваги $\Sigma M_a + \Sigma Z_a$. Таким чином:

$$C_a = \Sigma M_a + \Sigma Z_a + \Sigma A_a + \Sigma HZ_a + P_a; \quad (17)$$

$$C_6 = C - C_a. \quad (18)$$

У разі, коли заводської калькуляції на певну конструкцію немає, отже, не можна визначити фактичні значення C_a та C_6 , а також їх відношення, потрібно при оцінці залізобетонних конструкцій користуватися [4,5]. При цьому величину C_a визначають як суму вартості всієї сталі даного елемента, вартості виготовлення напруженої арматури та ненапруженої арматури, вартість укладання арматури у форму і вартість натягання арматури, прийнятої з коефіцієнтом 1.145. Величина C_6 є сумою вартості бетону розглядуваного елемента, вартості його формування, витрат на утримання форм і собівартості пара, прийняту з коефіцієнтом 1.145. При цьому сума $C_a + C_6$ повинна дорівнювати повній розрахунковій вартості конструкції C_k , вартості C_a і C_6 повинні бути віднесені відповідно до одиниці об'єму сталі та бетону.

Коефіцієнти армування. У формули для визначення одиничної витрати умовного бетону входять: μ - коефіцієнт армування; φ_a - коефіцієнт використання арматури. Це так звані арматурні показники.

Для елементів, що згинаються:

$$\mu = \frac{R_b}{R_s} \xi_1 = \frac{R_b}{R_s} (1 - \sqrt{1 - a}); \quad (19)$$

$$\text{де} \quad a = \frac{2M}{R_b b h_0^2},$$

M – розрахунковий згинальний момент;

R_b - розрахунковий опір бетону осьовому стисненню;

$\frac{bh_0^2}{2}$ - статичний момент робочого перерізу елементу. Його інший вираз:

$$S_0 = \frac{\alpha \varphi_b h^3}{2}. \quad (20)$$

При значеннях $a \leq 0.5$ можна користуватися наближеною формулою для μ :

$$\mu = \frac{R_b}{R_3} \left(\frac{a}{2} + \frac{a^2}{8} \right). \quad (21)$$

Для залізобетонної балки, розташованої уздовж l_1 , величина “а” у разі рівномірного розподілу навантаження дорівнює:

$$a = \frac{2\Delta^2 \lambda^2 K_b}{R_b \varphi_b} \left[(nq + n^1 h_0 \gamma_b \varphi_{3n}) \tau + n^1 \gamma_b h_b \right] 0.8, \quad (22)$$

де: k_b – моментний коефіцієнт; q - рівномірно розподілене навантаження в кг/см^2 ; h_n - висота перерізу плити; h_b - висота перерізу балки; π , π^1 - коефіцієнти надійності за навантаженням; γ_b - питома вага бетону в кг/см^3 . Для позациентрове-стиснутих елементів в залежності від значення

$$\bar{n} = \frac{N}{R_b b h_0} \text{ при } \bar{n} < \xi_r,$$

$$\mu = \mu^1 = \frac{N}{R_s b h_0} \left[\frac{e}{h_0} - 1 + \frac{N}{2 R_b b h_0} \right]; \quad (23)$$

$$e = e_0 + (h_0 - a^1) / 2. \quad (24)$$

Величина стискувочої повздовжньої сили можна визначити за формулою:

$$N = k \left[(nq + n^1 h_n \gamma_b \varphi_{3n}) \Delta_c \lambda_c \tau_c \alpha_c h_c^2 + n^1 h_0^2 b_b \gamma_b \varphi_{3b} \lambda_b + n^1 \gamma_b h^2 c \alpha_c \xi_0 l_1 \right], \quad (25)$$

$$\text{тоді } \bar{n} = \left[(nq + n^1 h_n \gamma_b \varphi_{3n}) \alpha_c \tau_c + n^1 \left(\frac{h_b}{h_c} \right)^2 \gamma_b \varphi_{3b} \alpha_b h + n^1 \gamma_b \alpha_c \xi_0 h_c \right] \frac{k \Delta_c \lambda_c}{R_b \alpha_c \varphi_b}$$

при $\bar{n} > \xi_R$

$$\mu = \mu^1 = \frac{N}{R_s b h_0} \frac{e}{h_0} - \frac{1 - \xi_R + 2 \xi_R \left(\frac{e}{h_0} - 1 + \frac{n}{2} \right)}{1 - \xi_R + 2 \left(\frac{m - n(1 - n/2)}{1 - \delta} \right)} \quad (26)$$

тут
$$m = \frac{N_e}{R_b b h_0^2} = \frac{n e}{h_0}, \quad (27)$$

$$\xi = \frac{n(1 - \xi_R) + 2\alpha \tau_R}{1 - \xi_R + 2\alpha} \quad (28)$$

(для елементів з бетону класу В 40 і нижче);

$$\alpha = \frac{m - n \left(1 - \frac{n}{2} \right)}{1 - \delta} = \frac{n \left(e / h_0 - 1 + \frac{n}{2} \right)}{1 - \delta}; \quad (29)$$

$$\xi_R = \frac{\xi_0}{1 + \frac{R_s}{\delta_e} \left(1 - \frac{\xi_0}{1.1} \right)} \quad (30)$$

де $\xi_0 = 0.85 - 0.0008 R_b$; (31)

$\sigma_e = 5000$ - при використанні коефіцієнта умов роботи бетону $\gamma_{\delta 1} = 0.85$;

$\sigma_e = 4000$ - при використанні коефіцієнта $\gamma_{\delta 1} = 1$ або $\gamma_{\delta 1} = 1.1$;

R_b і R_s - в кгс/см².

Потрібно мати на увазі, що залізобетон це такий будівельний матеріал, міцність якого визначають коефіцієнтом армування. Так, для згинальних елементів коефіцієнт армування визначає величину стиснутої зони в стадії руйнування.

Коефіцієнти використання арматури і арматурні числа. Коефіцієнти використання арматури визначають у такій послідовності:

а) складається формула для обчислення об'єму робочої арматури, розташованої з одного боку залізобетонного елемента V_R ;

б) складається формула для обчислення об'єму робочої арматури, що знаходиться біля протилежного боку залізобетонного елемента V'_R ;

в) те ж, для обчислення об'єму монтажної арматури V_M ;

- г) те ж, для обчислення об'єму хомутів V_x ;
- д) те ж, для обчислення об'єму відгинів $V_{от}$;
- е) те ж, для обчислення об'єму закладних деталей $V_{зд}$;
- ж) визначають вартість кожного із зазначених об'ємів арматури за допомогою множення кожного з них на вартість відповідній одиниці об'єму $C_a^{I}, C_a^{II}, C_a^{III}$;
- з) після складання вартості знаходять загальну вартість усієї арматури залізобетонного елемента.

Цю загальну вартість W_a визначають за формулою:

$$W_a = C_a v_p + C_a^I v_p^I + C_a^{II} v_\mu + C_a^{III} v_x + C_a^{IV} v_{от} + C_a^V v_{зд} \quad (32)$$

$$\text{або } W_a = C_a v_p \varphi_a, \quad (33)$$

$$\text{де } \varphi_a = 1 + \frac{C_a^I v_p^I}{C_a v_p} + \frac{C_a^{II} v_\mu}{C_a v_p} + \frac{C_a^{III} v_x}{C_a v_p} + \frac{C_a^{IV} v_{от}}{C_a v_p} + \frac{C_a^V v_{зд}}{C_a v_p}. \quad (34)$$

і є коефіцієнт використання арматури. Іноді умовно приймають рівність вартостей $\sigma_a = C_a^I = C_a^{II} = \dots$ і коефіцієнт використання арматури одержує такий вигляд:

$$\varphi_a = 1 + \frac{V_p'}{V_p} + \frac{\delta_m}{V_p} + \frac{V_x}{V_p} + \frac{V_{от}}{V_p} + \frac{V_{зд}}{V_p} \quad (35)$$

Як правило, за дужки виноситься вартість робочої арматури однієї із сторін залізобетонного елемента.

Нижче наведено, як приклад, формула коефіцієнта використання арматури для однопрольотної балки із затисненими опорами:

$$\varphi_a = 1 + \frac{\lambda_2 \gamma}{\tau \lambda_\phi} + \frac{\lambda_2 \gamma_1}{\tau \lambda_\phi} + \frac{n' \lambda_1 \delta^2}{\tau * n * \lambda_\phi} + \frac{\varepsilon v \delta_1^2}{n * \tau * \beta} + \frac{4k \alpha_1 \alpha_2 \delta_2}{\tau * \lambda * \delta * \mu * \alpha (1 - \eta)}. \quad (36)$$

Значення коефіцієнта φ_a , за даними практики проектування, змінюються в таких межах: для плит: 1,83 - 3,05; для балок 1,32 - 4,70; для стояків 1,30 - 3,77. Кожний залізобетонний елемент характеризується визначеними величинами арматурного числа ρ .

В загальному випадку, площу робочої арматури залізобетонного елемента можна визначати за формулою:

$$A_s = \frac{N_i \rho_i}{R_s}, \quad (37)$$

де N_i --розрахункова величина нормальної стискуючої сили, яка визначається за формулою (25) у разі згинальних елементів:

$$N = \frac{M}{\varphi_\phi * h}. \quad (38)$$

Для прямокутних перерізів з одиночною арматурою:

$$\rho = \frac{1}{V} = \frac{1}{1 - 0.5 * \xi}, \quad (39) \quad \text{де } \xi = R_s \Delta_s / R_b * b * h_0 \quad (40)$$

Для позацентрове-стиснутих стояків при $\bar{n} \langle \xi_R$

$$\rho_2 = \frac{\frac{e}{n_0} - 1 + \frac{\bar{n}}{2}}{1 - \delta}. \quad (41)$$

Для позацентрове-стиснутих стояків при $\bar{n} \langle \xi_R$

$$\rho_3 = \frac{\frac{e}{h_0} - \frac{1 - \xi_R + 2\xi_R \left(\frac{e/h_0 - 1 + \bar{n}/2}{1 - \delta} \right)}{1 - \xi_R + 2 \left(\frac{m - \bar{n} \left(1 - \bar{n}/2 \right)}{1 - \delta} \right)}}{1 - \delta}. \quad (42)$$

Визначення ефективних розмірів залізобетонних елементів. Аналіз формул (19), (23), (26), за якими визначають коефіцієнт армування залізобетонних елементів, що згинаються і позацентрове-стиснутих, показує, що при незмінних значеннях зусиль M і N фізико-механічних характеристик R_b , R_s ширини перерізу і захисних шарів a , a_1 коефіцієнт армування залежить від h , тобто кожна з наведених формул визначає залежність між двома величинами μ і h , у свою чергу, допускає численність рішень μ залежно від значень h .

Для отримання однозначних величин μ і h потрібне додаткове незалежне зусилля, яке може дати формула (27). Ця формула при заданих значеннях $\lambda, \tau, \alpha, \varphi_b, \varphi_a, \varphi_3, C_a, C_b$ дає додаткову залежність між μ , h і W – одиничною витратою умовного бетону. Знайшовши похідну W по одному з аргументів і прирівнявши її до нуля знаходимо необхідну додаткову умову для залежності між μ і h , що визначає найбільш ефективні значення μ і h .

Плита. Підставивши в (4) значення ν_b по (6), значення ν_a по (7), значення μ по (19) і виконавши перетворення, отримаємо одиничну витрату умовного бетону на залізобетонну плиту, яку визначають з умови міцності за формулою:

$$W_n = \frac{\varphi_{3n}}{\xi_0 \Delta_n^2 \lambda_n} - \frac{C_a \tau_n \varphi_b \varphi_{an} R_l}{C_b \xi_0 \Delta_n^2 \lambda_n R_s} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2(nk_1 q \tau_n^2 \lambda_n + k_2 n^1 h_n \varphi_{3n} \gamma_3 \tau_n^2 \sigma_n^2)}{\varphi_\sigma^2 R_b}} \right). \quad (43)$$

Граничне значення підкореного рівняння дорівнює $(1 - \xi_{hR})^2$ або $1 - 2A_k$. Нехай в крайньому випадку $\lambda_n = \lambda_{on}$ і $h_n = h_{on}$. Тоді одинична витрата умовного

бетону на залізобетонну плиту може визначатися так:

$$W = \frac{\varphi_{3n}}{\xi_0 \Delta_n^2 \lambda_n} + \frac{C_a \tau_n \varphi_b \varphi_{on} R_b}{C_b \xi_b \Delta_n^2 R_s \lambda_n} + \frac{C_a \tau_n \varphi_b \varphi_{an} R_b}{C_b \xi_0 \Delta_n^2 R_s} \sqrt{\frac{1}{\lambda_n^2} - \frac{2A_R}{\lambda_{on}^2}}. \quad (44)$$

де $\varphi_{an} = \varphi_{on} + \varphi_{en} + \frac{\varphi_n}{\lambda_n}$, де $\varphi_{on} = 1 + \frac{\lambda_n \sigma^2}{n_1 \beta}$;

$$\varphi_{1n} = \gamma \lambda_1 + \gamma \lambda_2 + \frac{\alpha_n \sigma^2 \lambda_1}{n \beta} + \frac{\alpha_n \sigma^2 \lambda_2}{n \beta}. \quad (45)$$

Значення одиничної витрати умовного бетону виходить для величини λ_n , яке визначають з рівняння (46)

$$\lambda_r^3 2A_R \left[\frac{A^2}{\lambda_{on}^2} + \frac{2A \varphi_{an}}{\lambda_{on}^2} + \frac{\varphi_{on}^2}{\lambda_{on}^2} + \frac{2A_R \varphi_m^2}{\lambda_{on}^2} \right] + \frac{4A_R A \varphi_m}{\lambda_{on}^2} \lambda_n^2 - \lambda_n \left[A^2 + 2A \varphi_{an} + \frac{2A_R \varphi_m^2}{\lambda_{on}^2} \right] - 2A \varphi_{1n} = 0$$

де $A = \frac{C_b \varphi_{3n} R_s}{C_a \tau_n \varphi_b R_b}$, $A_R = \xi_R (1 - 0.5 \xi_R)$, (47)

Для випадку, коли залізобетонна плита не має верхньої арматури, що відповідає умові $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ і, в свою чергу, $\varphi_{1n} = 0$, рівняння (46) значно спрощується і виходить:

$$\lambda_n^2 = \frac{A(A + 2\varphi_{on})\lambda_{on}^2}{2A_R(A + \varphi_{on})^2}, \quad (48) \quad \text{тоді} \quad \lambda_n = \frac{\lambda_{on}}{A + \varphi_{on}} \sqrt{\frac{A(A + 2\varphi_{on})}{2A_R}}. \quad (49)$$

Величина λ_{on} визначається за формулою:

$$\lambda_{on} = \frac{k_2 n^1 \varphi_{3n} \gamma_b l_2}{\alpha_n k_1 q \Delta_n} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4A_R \varphi_b^2 R_b n k_1 q A_n^2}{k_2^2 (n_1)^2 \varphi_{3n}^2 \gamma_b^2 \tau_n^2 l_2^2}} \right) \quad (50)$$

коли відомі λ_n і λ_{on} за умови міцності, то відповідне ξ визначають за формулою:

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - \frac{2A_R \lambda_n^2}{\lambda_{on}^2}}. \quad (51)$$

Балка. Виходячи з обмежень з міцності, найбільше значення знаходять з рішення квадратного рівняння:

$$\lambda_{ob}^2 + \frac{n_1^1 k_{\delta}^1 \gamma_{\delta} \varphi_{3\delta} l_1}{n k_{\delta} (q + h_n \gamma_{\delta} \varphi_{3n}) \sigma_{\delta} \Delta_{\delta}} \lambda_{ob} - \frac{A_R \varphi_{\delta}^2 R_{\delta}}{n k_{\delta} (q + h_n \gamma_{\delta} \varphi_{3n}) \tau_{\delta} \tau_{1\delta}^2} = 0. \quad (52)$$

де у цьому випадку одиничні витрати умовного бетону для залізобетонної балки визначається по наступній формулі

$$W = \frac{\varphi_{3b}}{\xi_0 \Delta_\delta^2 r_\delta \lambda_\delta} + \frac{C_a \tau_\delta \varphi_\delta \varphi_{a\delta} R_\delta}{C_\delta \xi_0 \Delta_\delta^2 \tau_\delta R_s \lambda_s} - \frac{C_a \tau_{1\delta} \varphi_\delta \varphi_{a\delta} R_\delta}{C_\delta \xi_0 \Delta_\delta^2 \tau_\delta R_s} \sqrt{\frac{1}{\lambda_\delta^2} - \frac{2A_s}{\lambda_\delta^2}}, \quad (53)$$

Мінімальне значення W визначається для λ_σ з наступного рівняння (54):

$$\lambda_\sigma^3 2A_R \left(\frac{2A \varphi_{o\delta}}{\lambda_{o\delta}^2} + \frac{A^2}{\lambda_{o\delta}^2} + \frac{\varphi_{o\delta}^2}{\lambda_{o\delta}^2} + \frac{2A_R \varphi_{o\delta}^2}{\lambda_{o\delta}^2} \right) + \frac{4A_R A \varphi_{o\delta}}{\lambda_{o\delta}^2} - \lambda_\sigma \left(A^2 + 2A \varphi_{o\delta} + \frac{2A_R \varphi_{1b}^2}{\lambda_{o\delta}^2} \right) - 2A \varphi_{1\delta} = 0$$

$$\text{де } A = \frac{\varphi_{3b} C_\delta R_s}{C_a \tau_\delta \varphi_\delta R_\delta}; \quad \varphi_{a\delta} = \varphi_{o\delta} + \varphi_{1\delta} / \lambda_\delta, \quad (55)$$

$$\varphi_{o\delta} = 1 + \frac{Ev\sigma_1^2}{\tau_\delta n \beta} + x; \quad \varphi_{1\delta} = \frac{\lambda_1 n^1 \delta^2}{\tau_\delta n} + \frac{\lambda_2 \gamma_1}{\tau_\delta} + \frac{\lambda_3 \gamma}{\tau_\delta} \quad (56)$$

x – постійна доля об'єму закладних деталей від об'єму робочої арматури. У випадку $\varphi_{1\delta} = 0$, що дає $\varphi_{a\delta} = \varphi_{o\delta}$, оптимальне значення міцності знаходять за формулою:

$$\lambda_\sigma = \lambda_{o\delta} \sqrt{\frac{A(A + 2\varphi_{o\delta})}{2A_R(A + \varphi_{o\delta})^2}} \quad (57)$$

Приклад №І: Визначити оптимальну висоту залізобетонної балки за вихідними даними: бетон міцністю $R_b = 100$ кгс/см² для $\gamma_{\gamma 1} = 1,1$; робоча арматура із сталі класу А-П з $R_s = 2700$ кгс/см². Співвідношення вартостей C_a/C_b дорівнює 26,5, величина навантаження $q = 0,081$ кгс/см², висота перерізу плити перекриття $h_n = 26$ см, величина коефіцієнта повноти перерізу плити $\varphi_{3n} = 0,32$. Величина $\tau_\sigma = 1$. Коефіцієнт повноти перерізу балки $\varphi_{3b} = 1$, величина $\varphi_b = 0,917$, крок балок $l_2 = 600$ см. Коефіцієнт використання арматури балки $\varphi_{a\delta} = \varphi_{o\delta} = 1,51$, отже, величина $\varphi_{1\delta}$ прийнята такою, що дорівнює 0. Величини: $nk_\delta = 0,105$, $n^1 k_\delta^1 = 0,0925$, $r_\delta = 600/20 = 30$, $\Delta_\delta = 1$, $l_1 = 600$ см. Вартість кубометра бетону прийнята 38,5 грн і 1 кг сталі -- 0,13 грн. Підставивши значення заданих параметрів в (52) одержують рівняння: $\lambda_{o\delta}^2 + 0,432 \lambda_{o\delta} - 104,5 = 0$; звідки $\lambda_{o\delta} = 10,004$. Обчислюють величини

$$A = \frac{2700}{26,5 * 1 * 0,916 * 100} = 1,11; \quad \lambda_\delta = 10 \sqrt{\frac{1,11(1,11 + 2 * 1,51)}{0,8(1,11 + 1,51)}} = 10 * 0,915 = 9,15.$$

Прийнятий переріз балки 65 x 20 см; $h_0 = 60$ см. Заданий згинальний момент в балці дорівнює 24,2 тм;

$$A_0 = \frac{2420000}{20 * 60^2 * 100} = 0,336 \text{ за відомими таблицями } \nu = 0,785;$$

$$A_s = \frac{2420000}{0,785 \cdot 60 \cdot 2700} = 19 \text{ см}^2, \text{ маса робочої арматури дорівнює } 14,9 \text{ кг/м.}$$

Вартість метра балки складає: $C = 0,2 \cdot 0,65 \cdot 38,5 + 14,8 \cdot 1,51 \cdot 0,13 = 5 + 2,93 = 7,93 \text{ грн/м.}$

Таким чином отримана найменша вартість балки за даних умов.

Рєбристе перекриття. Якщо крок балок ребристого перекриття дорівнює l_2 , а прольот дорівнює l_1 , то оптимальне значення прольоту знаходять з рівняння:

$$A_2 l_1^2 - A_1 = 0, \quad (58)$$

$$\text{де} \quad A_1 = \frac{\varphi_{3n} l_2}{\xi_0 \Delta_n^3 \lambda_n} + \frac{C_a \tau_n^2 (n k_1 q \lambda_n \Delta_n + k_2 n^1 l_2 \varphi_{3n} \gamma_3) \rho_n l_2}{C_b \xi_0 \Delta_n^3 \varphi_{on} R_s} \quad (59)$$

$$A_2 = \frac{C_a \tau_b^3 \left[\frac{k_b}{\Delta_n \lambda_n} \left(\frac{n_q \Delta_n \lambda_n}{l_2} + n \gamma_\sigma \varphi_{3n} \right) \tau_b^2 + n^1 k_b^1 \gamma_\sigma \varphi_{3b} \right] \rho_\sigma}{C_b \xi_0 \Delta_n^2 R_s \tau_\sigma}. \quad (60)$$

Приклад №2: Необхідно визначити оптимальний прольот збірного ребристого перекриття, для якого $k_1 = k_2 = 0,125$. Навантаження $q = 0,027 \text{ кг/см}^2$. Відстань між балками дорівнює 300 см , $\lambda_n = 26,6$ (тобто товщина плити дорівнює близько 11 см). Коефіцієнт повноти перерізу плити $\varphi_{3n} = 0,528$, коефіцієнт надійності за навантаженням $p_1 = 1,2$ (для власної ваги покриття). Відношення вартостей $C_s/C_b = 60$. Відношення кроку балок до ширини перерізу балки $r_b = 15$. Арматурне число балки $\rho_\delta = 1,98$ і плити $\rho_n = 1,932$; $R_s = 6800 \text{ кг/см}^2$. Крім того: $\Delta_n = 0,958$; $\varphi_{\delta n} = 0,89$; $\gamma_\delta = 0,0025 \text{ кг/см}^2$; $\tau_\delta = 1,033$; $k_b = 0,125$; $n_q = 0,033$; $\Delta_\delta = 1,0$; $\varphi_{\delta \delta} = 0,938$; $\tau_n = 0,976$; $k_\delta^1 = 0,125$; $\varphi_{3b} = 1,0$; $\xi_0 = 1$. Потрібно визначити оптимальний проліт ребристого перекриття при вказаних даних. Знаходимо $l = 1034,81 \text{ см}$.

Порівняння залізобетонних конструкцій проводять по величині одиничної витрати умовного бетону /ОВУБ/, яка може бути визначена для кожної залізобетонної конструкції, якщо відомі ОВУБ та складові її елементи. Нижче наведені математичні моделі ОВУБ для залізобетонних елементів конструкцій.

Математичні моделі одиничних витрат умовного бетону для залізобетонних елементів. Для плити:

$$W = \frac{\varphi_{3n}}{\xi_0 \Delta_n^2 \lambda_n} + \frac{C_a \tau_n \varphi_b \varphi_{on} R_b}{C_b \xi_0 \Delta_n^2 R_s \lambda_n} - \frac{C_a \tau_n \varphi_b \varphi_{on} R_b}{C_b \xi_0 \Delta_n^2 R_s} \sqrt{\frac{1}{\lambda_n^2} - \frac{2 n k_1 q \tau_n^2}{\varphi_\sigma^2 R_b} - \frac{2 k_1 n^1 \varphi_{3n} \gamma_b \tau_n^2 l^2}{\varphi_b^2 R_b \Delta_n \lambda_n}}, \quad (61)$$

де для плити із заданим значенням коефіцієнта армування:

$$W = \frac{\varphi_{3n}}{\xi_0 \Delta_n^2 \lambda_n} + \frac{C_a \tau_n \varphi_b \varphi_{on} R_b}{C_b \xi_0 \Delta_n^2 R_s \lambda_n}, \quad (62)$$

де для балки (63):

$$W = \frac{\varphi_{3n}}{\xi_0 \Delta_b^2 \lambda_b \tau_b} + \frac{C_a \tau_b \varphi_b \varphi_{on} R_b}{C_b \xi_0 \Delta_b^2 R_s \lambda_b} - \frac{C_a \tau_b \varphi_b \varphi_{ob} R_b}{C_b \xi_0 \Delta_b^2 R_s \lambda_b} \sqrt{1 - \frac{2nk_b(q + h_n \gamma_b \varphi_{3n}) \tau_b \tau_{1b}^2 \lambda_b}{\varphi_a^2 R_b} - \frac{2k_b n^1 \varphi_{3b} \gamma_b \tau_b^2 l^2 \lambda_b}{\varphi_b^2 R_b \Delta_b}}$$

Для балки із заданим значенням коефіцієнта армування:

$$W = \frac{\varphi_{3n}}{\xi_0 \Delta_b^2 \lambda_b \tau_b} + \frac{C_a \tau_b \varphi_b \varphi_{ob} M_b}{C_b \xi_0 \Delta_b^2 R_s \lambda_b}. \quad (64)$$

Для позациентрове стиснутому в загальному випадку стояка:

$$W = \frac{\varphi_{3c}}{\tau_c \lambda_c} + \frac{C_a \tau_c \varphi_{ac} M_c^i}{C_b \lambda_c \tau_c \xi_0}, \quad (65)$$

де для випадку $n \leq \xi_R$ для стояка з симетричним армуванням коефіцієнтом

армування M не дорівнює M^1 приймають за формулою (23), а для випадку $n > \xi_R$ коефіцієнти армування $M=M^1$ приймають за формулою (26).

Для позациентрове-навантаженого плитного фундаменту під залізобетонний стояк

$$W_\phi = \frac{\varphi_{3\phi} E_x E_y}{E_\phi \lambda_1^2 \lambda_2} + \frac{C_a \varphi_a E_x \left(\varphi_{\phi} \frac{\tau_x}{E_x} + q + q_\phi \right) \left(\frac{E_x}{3} - \frac{h_c}{2h_\phi} \right)}{3.6 C_b \xi_0 \lambda_1 \varphi_b R_s} + \frac{C_a E_y \left(\varphi_q \frac{\tau_y}{\tau_x} + q + q_\phi \right) \left(\frac{E_y}{3} - \frac{E_c h_c}{2h_\phi} \right)}{3.6 C_b \xi_0 \lambda_1 \varphi_b R_s \left(1 - \frac{\alpha}{\varphi_b h_\phi} \right)}; \quad (66)$$

де: $\lambda_1 = l_1 / h_\phi$; $\lambda_2 = l_2 / h_\phi$.

Математичні моделі одиничних витрат умовного бетону для залізобетонних конструкцій.

На підставі одиничних витрат умовного бетону для залізобетонних елементів складаються одиничні витрати умовного бетону для залізобетонних конструкцій. Для цього потрібно знати, які залізобетонні елементи входять в умовний об'єм розглядуваної конструкції. Для перекриття, що складається з двохпрольотних прогонів з кроком l_2 в умовний об'єм входить одна плита з прольотом l_2 і один прогін з прольотом l_1 :

$$W_1 = \frac{\varphi_{3b} \psi}{\xi_0 \Delta_b^1 (E_b^1) \alpha_b^1} + \frac{C_a \tau_b \varphi_b \psi \mu_b \varphi_{ab}}{C_b \xi_0 \Delta_b^1 (\tau_b^1)^2 \alpha_b^1} + \frac{\varphi_{3n}}{\xi_0 \Delta^1 \alpha_n^1 \psi} + \frac{C_a \tau_n \varphi_b \mu_n \varphi_{an}}{C_b \xi_0 \Delta^1 \alpha_n^1 \psi}. \quad (67)$$

Для перекриття, що складається з одного багатопрольотного розрізного прогону з прольотами l_2 , і двохпрольотної розрізної плити з прольотами l_1 . В умовний об'єм входить одна плита з прольотом l_1 і половина прогону з прольотом l_2 :

$$W_2 = \frac{\varphi_{3n} \psi}{\xi_0 \Delta_n \alpha_n} + \frac{C_a \tau_n \varphi_n \psi \mu_n \varphi_{an}}{C_b \xi_0 \Delta_n \alpha_n} + \frac{\varphi_{3b}}{2 \xi_0 \Delta_b \alpha_b \tau_b^1 \psi} + \frac{C_a \tau_b \varphi_b \mu_b \varphi_{ab}}{2 C_b \xi_0 \Delta_b \alpha_b \psi \tau_b^2}. \quad (68)$$

Так само складається математична модель одиничної витрати умовного бетону для будь-якої залізобетонної конструкції.

Визначення оптимальних розмірів залізобетонних стержньових конструкцій з ортогональне-розташованими стержнями. Цим поняттям охоплюють багатопрольотні багатопверхові залізобетонні рами, в тому числі і тришарнірні залізобетонні рами, і багатопрольотні нерозрізні балки. Повна вартість стержньової залізобетонної конструкції може бути представлена у вигляді скалярного добутку двох n -мірних векторів:

$$W = A_1 l_1 + A_2 l_2 + A_3 l_3 + \dots + A_n l_n, \quad (69)$$

де $A = (A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$ -вектор, що характеризує вартість погонного метра стержнів конструкції;

$z = (l_1, l_2, l_3, \dots, l_n)$ -- вектор, кожний компонент якого уявляє довжину одного із стержнів конструкції. Якщо, наприклад, є три стержні довжиною l_3 , то A_3 повинне уявляти собою суму вартостей пог.м. кожного з цих стержнів. Вектор z , найчастіше задається, тобто задають розміри всіх її ярусів.

Вектор A є шуканим. Повинні мати місце співвідношення:

$$\frac{A_1}{l_n} = \frac{A_2}{l_{n-1}} = \dots = \frac{A_{n-1}}{l_2} = \frac{A_n}{l_1}. \quad (70)$$

За наявності цих співвідношень, достатньо знати один з компонентів векторів A , щоб визначити всі інші його компоненти і, таким чином, визначити за формулою (69) вартість розглядуваної стержньової конструкції.

Наприклад, відомо A_1 . тоді з відношення (70) отримують:

$$A_2 = \frac{l_{n-1}}{l_n} A_1; A_3 = \frac{l_{n-2}}{l_n} A_1; \dots A_{n-1} = \frac{l_2}{l_n} A_1; A_n = \frac{l_1}{l_n} A_1. \quad (71)$$

Якщо A має найменшу можливу величину, то, природно за формулою (69) теж можна знайти найменшу величину. Отже, пошук оптимального значення величини W за формулою (69) зводиться до пошуку оптимальної величини одного з компонентів векторів A . Рекомендується такий порядок пошуку оптимального значення W за формулою (69), стосовно залізобетонної рами: 1. Задають конфігурацію рами, а саме кількість і розрахункові прольоти ригелів, кількість і висота поверхів рами. 2. Задають величину і характер навантажень на раму. 3. Виконують пружний розрахунок рами на задані навантаження і будують епюру згинаючих моментів. 4. Розглядають один з ригелів рами (бажано з більшим прольотом) і за формулами (52) – (56) визначають його оптимальне значення, чим і визначають величину заданого компонента вектору A . 5. Знаходять інші $(n-1)$ компоненти шуканого вектора і обчислюють мінімальне значення величини W за формулою (69).

Висновки. Проведені дослідження виконані з метою встановлення діапазону можливих обмежень геометричних розмірів рами і уточнюють (окреслюють) область прийняття раціональних проектних рішень за одним із універсальних, узагальнених критеріїв ефективності конструкції: витрат сталі на конструкцію, вартості конструкцій, вартості зведених витрат. Розроблена методика по проектуванню економічних залізобетонних конструкцій, в якій обумовлені методи визначення перерізів елементів конструкцій, що забезпечують найменшу їх вартість.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рейтман М.И. Оптимизация параметров железобетонных конструкций на ЭЦВМ / М. И. Рейтман, Л. И. Ярин. -М.: Стройиздат, 1974. – 96 с.
2. Репях В.И. Оптимальное проектирование железобетонных конструкций: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / В. И. Репях. –К.: 1973. – 15 с.
3. Разработка новой или усовершенствование укрупненной конструкции железобетонной плиты перекрытий и покрытий к типовым проектам жилых домов серии 111-26. (Отчет 16.02.79 о НИР, Б731080) / Рук. к.т.н. Першаков В.Н. –К.: УкрНИИПграждансельстрой, 1979. - 30 с.
4. Руководство по визначенню розрахункової вартості та трудомісткості виготовлення збірних залізобетонних конструкцій на стадії проектування. Конструкції житлових та громадських будівель. - К.: Будівельник, 1987.–36 с.
5. Першаков В.М. Каркасні будинки з тришарнірних залізобетонних рам: Монографія / В.М. Першаков – К.: Книжкове видавництво НАУ, 2007. -301 с.